

ESTW-Kabelanlagen: Relevante Einflüsse auf den Isolationswiderstand

The relevant influences on the insulation resistance of electronic interlocking cable systems

Jörn Groos | Xiang Zhang | Christian Linder

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) arbeitet in Kooperation mit der Bender GmbH & Co. KG sowie der DB Netz AG an modernen datengetriebenen Ansätzen für die Überwachung von ESTW-Kabelanlagen zur Vermeidung von sicherheitskritischen Isolationsfehlern. Dieser Beitrag stellt die Fortschritte bei der explorativen Datenanalyse zur Identifikation relevanter Faktoren bezüglich meteorologischer Bedingungen sowie des Bahnbetriebes vor. Abschließend wird ein Ausblick auf die geplanten weiteren Forschungsaktivitäten gegeben.

1 Einleitung

Das DLR erforscht am Institut für Verkehrssystemtechnik (TS) in Braunschweig und Berlin in mehreren Projekten Methoden für die Zustandsüberwachung von Elementen der Eisenbahninfrastruktur sowie deren Einbindung in die operativen Entstörungs- und Instandhaltungsprozesse. Ziel ist die Umsetzung vollständiger Verarbeitungsketten von der Sammlung der Sensor-Rohdaten über deren Vorverarbeitung und Analyse zur Extrahierung relevanter Zustandsinformationen bis hin zur Ableitung konkreter Maßnahmen im Rahmen einer zustandsabhängigen präventiven Instandhaltung [1]. Im Zuge dieser Zielsetzung hat das DLR in einer Kooperation mit der Bender GmbH & Co. KG sowie der DB Netz AG begonnen, die kontinuierliche Überwachung von Kabelanlagen elektronischer Stellwerke (ESTW) hinsichtlich des Isolationswiderstandes der elektrischen Gesamtanlage zu untersuchen [2]. Hierbei werden aufgrund der Erfahrungen der DB Netz AG insbesondere adrig verseilte Signalkabel älterer Generation untersucht. Diese sind schon länger dafür bekannt, aufgrund häufiger Isolationsfehler einen signifikanten Anteil der Verspätungsminuten zu verursachen. Trotz am Markt verfügbarer Messgeräte existiert aktuell nach wie vor keine Methodik, um diese für eine kontinuierliche Zustandsüberwachung, die über die Anwendung einfacher Alarmschwellwerte hinausgeht, einzusetzen. Es ist erforderlich, ein tieferes Verständnis des Anlagenverhaltens hinsichtlich des Zeitverhaltens der Isolationswerte sowie deren Zusammenhang mit dem Stellwerksbetrieb und den Umgebungsbedingungen wie Wetter und Feuchtigkeit zu erarbeiten. In Kooperation mit Bender und der DB Netz wird an der Operationalisierung einer kontinuierlichen datengetriebenen Zustandsüberwachung gearbeitet.

2 Ziele der Forschungsarbeiten

Die mit einem Testaufbau im Stellwerk Plattling [2] erstmals im operativen Betrieb eines ESTW kontinuierlich erhobenen Messdaten des Isolationswiderstandes haben eindrücklich gezeigt, dass dieser im Zeitverlauf erheblichen Schwankungen zwischen typischerwei-

The German Aerospace Centre (DLR) is working in cooperation with Bender GmbH & Co. KG and DB Netz AG on modern data-driven approaches to monitoring electronic interlocking cable systems in order to avoid safety-critical insulation faults. This paper presents the progress made in exploratory data analysis for the identification of the relevant factors related to meteorological conditions and railway operations. The outlook for further research activities is given in the conclusion.

1 Introduction

The DLR is researching methods for the condition-monitoring of railway infrastructure elements as well as their integration into the operative fault clearance and maintenance processes at the Institute of Transportation Systems (TS) in Braunschweig and Berlin. The goal is the implementation of complete processing chains from the collection of raw sensor data through to the pre-processing and analysis for extracting the relevant status information and on to the derivation of concrete measures as part of the condition-based preventive maintenance [1]. In pursuit of this objective, the DLR is collaborating with Bender GmbH & Co. KG and DB Netz AG in order to investigate the continuous monitoring of the cable installations for electronic interlocking systems with regard to the insulation resistance of the entire electrical system [2]. This will especially be investigated with regard to stranded signal cables of a specific older generation, based on the experience of DB Netz AG. These have long been known to cause a significant share of the delay minutes due to frequent insulation faults. Despite the availability of measuring devices on the market, there is still no available method for continuous condition-monitoring which goes beyond the application of simple alarm thresholds. It is therefore necessary to develop a deeper understanding of the system's behaviour and the time behaviour of the insulation resistance and its correlation with interlocking operations, as well as any ambient conditions such as weather and humidity. The DLR is working on the operationalisation of continuous data-driven condition-monitoring in cooperation with Bender and DB Netz.

2 The goals of the research

The measured insulation resistance data, which was continuously collected for the first time during daily operations using a test setup at the electronic interlocking in Plattling, Bavaria [2], has emphatically shown that this varies considerably over time typi-

se etwa 500 k Ω bis 2000 k Ω unterliegt (siehe [2] und Bild 1). Dabei treten sowohl sehr kurzfristige (wenige Minuten) als auch langfristige (über mehrere Stunden bis zu einigen Tagen) Veränderungen des Isolationswiderstandes der Anlage auf. Gemäß Konzernrichtlinie der DB Netz AG liegt die Alarmschwelle bei 30 k Ω bzw. 50 k Ω . Messwerte unterhalb dieser Schwelle führen zu protokollierten Alarmen, während der gesamte übrige Verlauf der Messwerte unbeobachtet bleibt. Daher ist eine zentrale Hypothese für die aktuellen Forschungsarbeiten die Annahme, dass die Schwankungen oberhalb der bestehenden Alarmwerte wertvolle Informationen für die frühzeitige Erkennung sich anbahnender sicherheitskritischer Isolationsfehler bieten. Die konkrete Zielstellung der Forschungsarbeiten am DLR ist die Entwicklung von Modellen zur Prädiktion des Isolationswiderstandes eines ESTW in Abhängigkeit der relevanten Einflussfaktoren sowie des Anlagenverhaltens in der Vergangenheit. Die Entwicklung derartiger Modelle dient dem Aufbau eines tiefgehenden Anlagenverständnisses und der automatischen Erkennung unerwarteter Anlagenzustände bzw. sich anbahnender Isolationsfehler. Sie sind eine Voraussetzung für ein zustandsabhängiges präventives Instandhaltungsmanagement. Durch die Verknüpfung mit den digital protokollierten Betriebsdaten des Stellwerkes (RIES-Daten) soll außerdem eine Eingrenzung der für einen erkannten Isolationsfehler möglicherweise ursächlichen Elemente des ESTW erreicht werden. Diese Fehlereingrenzung würde eine signifikante Zeiterparnis bei der Entstörung der Anlagen im Fehlerfall bewirken. Für die Entwicklung zuverlässiger prädiktiver Modelle ist die Identifikation aller relevanten Einflüsse sowie geeigneter Parameter zur messtechnischen Erfassung dieser Einflüsse unabdingbar. Im Folgenden werden die aktuellen Erkenntnisse zu relevanten Einflussfaktoren aus der laufenden explorativen Datenanalyse vorgestellt.

3 Auswirkungen des Bahnbetriebs

Die beobachteten diskreten Einbrüche des Isolationswiderstandes um mehrere hundert k Ω (bei trockenen Bedingungen, siehe Medianwerte um 500 k Ω in Bild 1) und mit einer Dauer von einigen wenigen Minuten treten im Tagesverlauf gehäuft zu den vollen Stunden auf [2]. Dies entspricht den Zeiten mit dem höchsten Verkehrsaufkommen (abfahrende Züge) am Bahnhof Plattling (Nullknoten). Bei einer detaillierteren Analyse zeigt sich, dass sich die Einbrüche des Isolationswiderstandes dabei nicht zeitlich zufällig verteilt im Bereich der vollen Stunden ereignen. Vielmehr bildet sich ein sich täglich wiederholendes zeitliches Muster von zu bestimmten Zeiten überwiegend um die vollen Stunden stattfindenden Einbrüchen aus. In Bild 2 sind beispielhaft die Widerstandsmesswerte für drei Tage (Sonntag, 19. April

cally between about 500 k Ω and 2000 k Ω (see [2] and fig. 1). The alarm threshold is 30 k Ω or 50 k Ω according to the standard procedures (Konzernrichtlinien) of DB Netz AG. Any values measured below this threshold will result in logged alarms, while the rest of the measured values remain unobserved. The hypothesis for the current research work is the assumption that any fluctuations above the existing alarm thresholds provide valuable information for the early detection of impending safety-critical insulation faults. The specific objective of the research work at the DLR is to develop models for predicting the insulation resistance of an electronic interlocking as a function of the relevant influencing factors as well as the system behaviour in the past. The development of such models serves to build up a deep understanding of the system and the automatic detection of unexpected system states or imminent insulation faults. Such models are a prerequisite for condition-based preventive maintenance management. A further major interest concerns the identification of the specific element or cable affected by an insulation fault by linking the insulation resistance measurements with the logged operation data of the electronic interlocking (RIES data). Such localisation of potentially defective elements would result in significant time savings during fault repairs. It is essential to identify all the relevant influences as well as any suitable parameters for the metrological recording of these influences, in order to develop reliable predictive models. The following text presents the current findings on the relevant influencing factors from the exploratory data analysis.

3 The effects of the interlocking operation

The observed discrete interruptions in the insulation resistance by several hundred k Ω (under dry conditions, see the median values of around 500 k Ω in fig. 1) with a duration of a few minutes frequently occurred during the course of the day on the hour [2]. This corresponds to the times with the highest traffic volumes (departing trains) at Plattling station (null node). A more detailed analysis shows that the interruptions in the insulation resistance do not occur randomly within the range of the full hours. Rather, a stable temporal pattern of daily interruptions occurs at certain times, mostly near the full hours. Fig. 2 shows the resistance values for three days (19th April to 21st April 2015) according to the time of day. Most of the interruptions occurred on all three days and coincided closely with the timetable at the Plattling station. Particularly pronounced reoccurring interruptions coincided with the ICE arrivals and departures (a 2-hour time cycle) at 10 am, 12 pm, 2

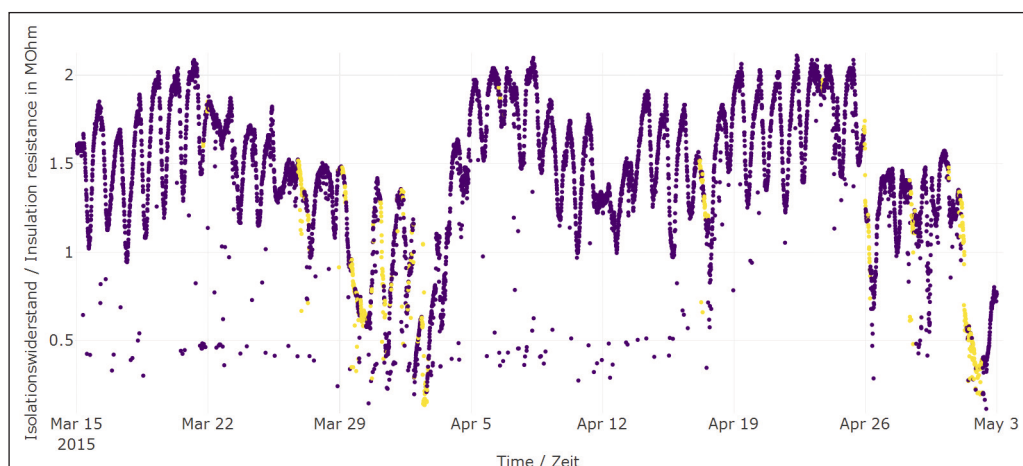
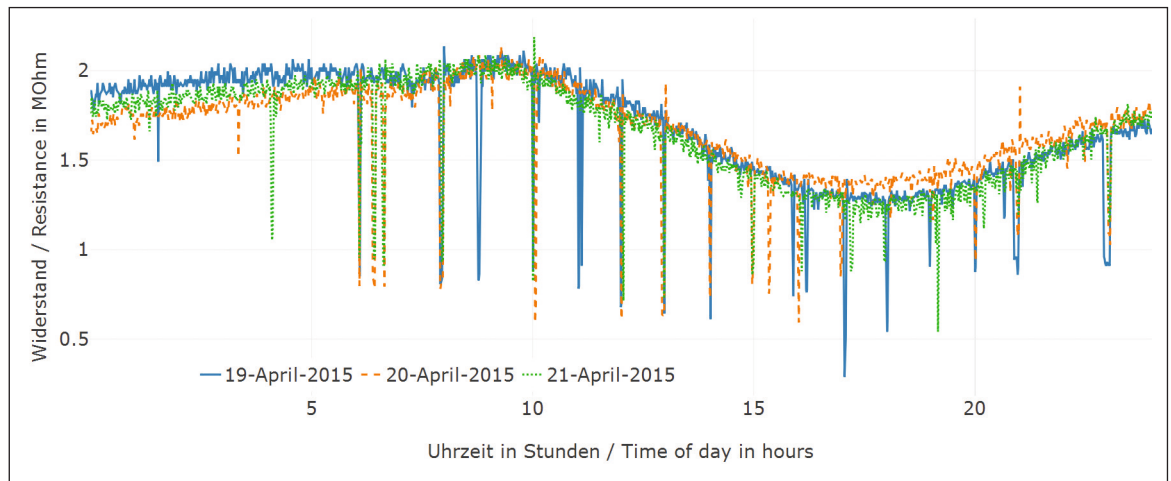


Bild 1: Median des Isolationswiderstandes in aufeinanderfolgenden Zeitfenstern von 10 Minuten Länge. Blau: Kein Niederschlag; Gelb: Niederschlag. Quelle der meteorologischen Daten: Deutscher Wetterdienst, DWD

Fig. 1: The median of the insulation resistance in successive time windows of 10 minutes in length. Blue: no precipitation; Yellow: precipitation. Source of the meteorological data: Deutscher Wetterdienst, DWD

Bild 2: Messwerte des Isolationswiderstandes von 0 – 24 Uhr am 19. April (blau), 20. April (orange) und 21. April 2015 (grün)

Fig. 2: Measured values of the insulation resistance from 0 – 24 o'clock on 19th April (blue), 20th April (orange) and 21st April 2015 (green)



bis Dienstag, 21. April 2015) über die Tageszeit aufgetragen. Die Einbrüche treten mehrheitlich an allen drei Tagen auf und stimmen zeitlich sehr gut mit dem Fahrplan am Bahnhof Plattling überein. Besonders ausgeprägt und regelmäßig sind Einbrüche in zeitlicher Übereinstimmung mit den ICE-Ein- und Ausfahrten (2-Stunden-Zeittakt) um 10 Uhr, 12 Uhr, 14 Uhr, 16 Uhr und 18 Uhr. Ebenfalls besonders ausgeprägt ist das tägliche Auftreten eines vom Stundentakt abweichenden Einbruches im Zeitraum von 07:50 – 07:55 Uhr in Übereinstimmung mit der Fahrzeit von IC 2024. Abweichungen zwischen dem 19. April (Sonntag) im Vergleich zum 20./21. April 2015 (z. B. zusätzliche Einbrüche gegen 08:45 Uhr und 11:06 Uhr am 19. April) stimmen mit den Unterschieden im Fahrplan zwischen Werk- und Sonntagen überein. Auffällig ist das vergleichsweise seltene Auftreten von Einbrüchen des Isolationswiderstandes bei den Nahverkehrsfahrten um 5 Uhr und 7 Uhr. Weitere Untersuchungen sollen zeigen, ob diese Unterschiede für die Diagnose (Erkennung der Ursache) der Widerstandseinbrüche genutzt werden können.

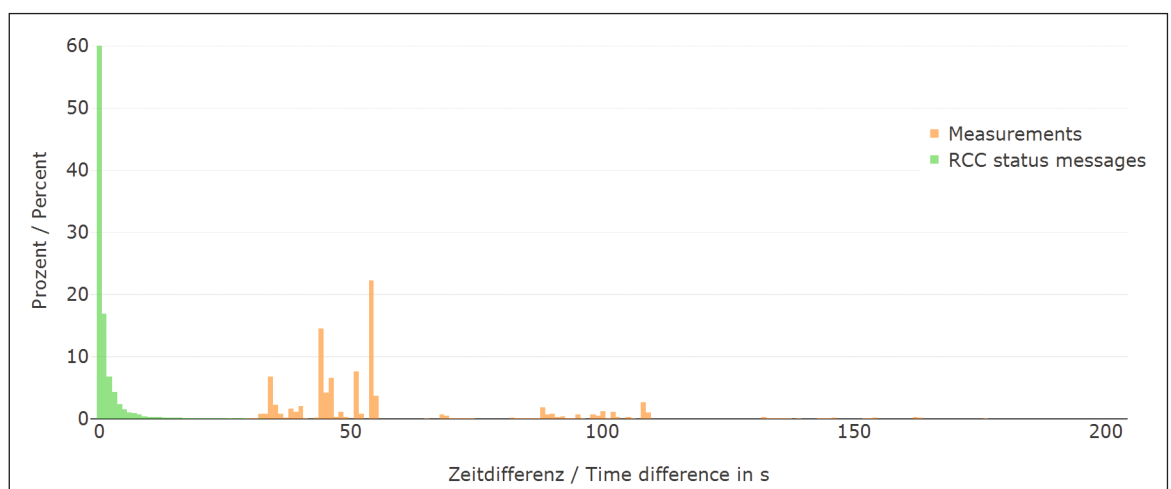
Für den Zeitraum vom 18. April 2015 bis einschließlich 2. Mai 2015 steht ein lückenloser Protokolldatensatz des stellwerkseitigen Diagnoserechners zur Verfügung. Der Datensatz enthält für das Stellwerk Plattling 495.954 Statusmeldungen von Feldelementen (Weichen, Signale, Fahrstraßenmelder etc.) sowie 8501 Stellbefehle/Bedienkommandos (Zugfahrstraßen, Rangierfahrstraßen, Einzelbefehle). Bei den Statusmeldungen treten insgesamt 306 verschiedene Zustände für elf Informationsarten und 202 verschiedene Elementbezeichner auf. Eine klassische elementweise Korrelationsanalyse

pm, 4 pm and 6 pm. The daily interruption was also particularly pronounced in the period from 07:50 to 07:55 in accordance with the travel time of the IC 2024. Deviations between 19th April (Sunday) and 20th and 21st April (i. e. additional interruptions at approximately 08:45 and 11:06 on 19th April) coincided with the timetable differences between workdays and Sundays. The comparatively rare occurrence of interruptions in insulation resistance during local traffic at 5 am and 7 am is striking. Further investigations will show whether these differences can be used to diagnose (recognise the cause) of the interruptions in resistance.

A complete data record of the electronic interlocking diagnostic system is available for the period from 18th April 2015 to 2nd May 2015. The data record for the Plattling interlocking contains 495,954 status messages of field elements (switches, signals, traffic route detectors, etc.), as well as 8,501 control commands/operating commands (train routes, shunting routes, individual commands). The status messages contain a total of 306 different states for eleven information types and 202 different element identifiers. A correlation analysis of the logged status messages and operating commands with the observed interruptions in the insulation resistance still remains without any tangible results with regard to the detection of direct cause and effect relationships. The reason for this is the large number of simultaneous control commands and state changes. During peak hours, more than 700 status messages are observed every 10 minutes. Another difficulty involves the discrepancy between the frequency of

Bild 3: Histogramme der Zeitdifferenzen zwischen den protokollierten Statusmeldungen des ESTW-Diagnoserechners (grün) und den Messwerten des Isolationswiderstandes (orange)

Fig. 3: Histograms of the time differences between the status messages of the RCC diagnostic log data (green) and the measurements of the insulation resistance (orange)



der protokollierten Statusmeldungen und Bedien-kommandos mit den beobachteten Einbrüchen des Isolationswiderstandes blieb mit Hinblick auf die Erkennung von direkten Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen noch ohne greifbares Ergebnis. Ursache hierfür ist einerseits die große Häufung zeitgleich stattfindender Stellbefehle und Zustandsveränderungen. Zu den Hauptverkehrszeiten werden über 700 Statusmeldungen pro 10 Minuten beobachtet. Eine weitere Schwierigkeit stellt die Diskrepanz zwischen der Häufigkeit von Statusveränderungen bei den Elementen und der Häufigkeit der Widerstandsmessung dar. In Bild 3 sind Histogramme für die Zeitabstände zwischen den Statusmeldungen (grün) und den Messwerten des Isolationswiderstandes (orange) aufgetragen. Die Zustandsänderungen erfolgen typischerweise im Sekundentakt. Die Mindestzeitdauer für die Messung des Isolationswiderstandes liegt bei etwa 0,7 Sekunden, dieser Wert wird bei realen ESTW jedoch aus technischen Gründen selten erreicht. Im Stellwerk Plattling werden typischerweise Zeitabstände von um die 50 Sekunden beobachtet. Die erforderliche Zeit für die Messung des Isolationswiderstandes wird u. a. von den ablaufenden Schaltvorgängen sowie von der Kapazität und vom technischen Zustand der Gesamtanlage beeinflusst. Zahlreiche beobachtete Korrelationen zwischen Zustandsveränderungen einzelner Elemente und dem zeitgleichen Auftreten von Einbrüchen des Isolationswiderstandes müssen vor diesem Hintergrund bislang als zufällig angesprochen werden. Gegenstand laufender Forschungsaktivitäten ist nun die Rekonstruktion konkreter Zugfahrten sowie deren exakten Zeitverlaufs aus den vorhandenen Stellwerkdaten. Hierbei soll untersucht werden, ob über Zeiträume von mehreren Tagen bis wenigen Wochen die auftretenden geringen täglichen Abweichungen vom Fahrplan mit den geringfügigen zeitlichen Variationen im täglichen Auftreten der Widerstandseinbrüche korreliert werden können. Dies könnte deren Zuordnung zu konkreten Zugfahrstraßen ermöglichen. Weiterhin wird untersucht, inwieweit mit überwachten Lernverfahren gebildete prädiktive Modelle in der Lage sind, die Einbrüche anhand der Stellwerksdaten zuverlässig widerzugeben. Der aktuell verfügbare Datensatz ist für Training und insbesondere Validierung entsprechender Modelle allerdings nicht ausreichend. Bei kommenden Messkampagnen (siehe Ausblick) sollen daher umfassendere Protokolldatensätze aus den Stellwerken erhoben werden. Weiterhin soll untersucht werden, inwieweit bereits die Verteilung der Zeitdifferenzen der Widerstandsmessungen (Bild 3) Informationen für eine Beurteilung des Gesamtanlagenzustandes liefern kann.

4 Einfluss meteorologischer Umgebungsbedingungen

Bereits die ersten in [2] vorgestellten Analysen zeigten auf, dass insbesondere die meteorologischen Umgebungsbedingungen wie z. B. Niederschläge mit einem erheblichen Teil der beobachteten Schwankungen in Zusammenhang stehen. Für die explorative Datenanalyse hinsichtlich der meteorologischen Einflüsse wurden die Messwerte des Isolationswiderstandes am ESTW in Plattling mit meteorologischen Daten der Messstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Metten (Stations-ID 3271) verglichen. Der DWD stellt über einen Open Data Server (<https://opendata.dwd.de/>) umfangreiche meteorologische und klimatische Datensätze unentgeltlich zur Verfügung. Für die explorative Datenanalyse wurden 10-Minuten-Werte der Lufttemperatur (2 m über Grund), der Temperatur am Boden (5 cm über Grund), der relativen Luftfeuchte (2 m über Grund) sowie die Niederschlagsmenge in mm in den vorangegangenen 10 Minuten verwendet. Aus diesen vom DWD bereitgestellten Messdaten wurden weitere Größen wie die Niederschlagsmenge in größeren vorangegangenen Zeiträumen (1 Stunde, 6 Stunden, 12 Stunden, 24 Stunden) sowie die seit dem letzten registrier-

the element status changes and the frequency of the resistance measurements. Fig. 3 shows histograms for the time intervals between the status messages (green) and the insulation resistance measurement values (orange). The state changes typically occur every second. The minimum period for measuring the insulation resistance is about 0.7 seconds, but this value is rarely achieved with the real electronic interlocking for technical reasons. Time intervals of around 50 seconds were typically observed at the electronic interlocking in Plattling. The time required to measure the insulation resistance is influenced, amongst other things, by the interlocking operation, the capacity and the technical condition of the entire system.

Against this background, the numerous observed correlations between state changes of individual elements and the simultaneous occurrence of drops of the insulation resistance must be addressed as coincidental. The subject of the ongoing research activities now involves the reconstruction of specific train journeys and the exact time involved using the existing interlocking data. An investigation will be undertaken in order to ascertain whether the minor daily deviations from the timetable over periods of several days to a few weeks can be correlated with the minor temporal variations in the daily occurrence of the resistance interruptions. This could make it possible to assign them to specific train routes. Furthermore, an investigation will be made as to what extent predictive models formed using supervised learning methods are able to reliably reproduce the interruptions in insulation resistance on the basis of the interlocking data. The currently available dataset is, however, insufficient for training and in particular for the validation of the corresponding models. More comprehensive protocol data sets should therefore be collected from the electronic interlocking in future measurement campaigns (see The next steps / outlook). Furthermore, an investigation should be made into what extent the distribution of the time differences of the resistance measurements (fig. 3) can provide information for an assessment of the overall system.

4 The influence of meteorological conditions

The first analyses presented in [2] already showed that meteorological environmental conditions, such as precipitation, are associated with a considerable part of the observed fluctuations. The measurements of the insulation resistance at the electronic interlocking in Plattling were compared with meteorological data from the German Weather Service's (Deutscher Wetterdienst, DWD) measuring station in Metten (station ID: 3271) for the purposes of exploratory data analysis with regard to meteorological influences. The DWD provides extensive meteorological and climatic data sets via an open data server (<https://opendata.dwd.de/>) free of charge. The 10-minute values for air temperature (2 m above the ground), ground temperature (5 cm above the ground), relative humidity (2 m above the ground) and precipitation in mm were used for exploratory data analysis. Further variables such as precipitation over larger previous periods (1 h, 6 h, 12 h, 24 h) and the time elapsed since the last recorded precipitation were also derived from these measurements provided by the DWD. The median values of the insulation resistance values recorded in the corresponding time windows were determined for the 10-minute sampling intervals of the DWD data when comparing the recorded insulation resistance with the meteorological data. The mean values better reflect the continuous changes due to the smoothing effects and the suppression of individual outliers. When analysing the insulation resistance on

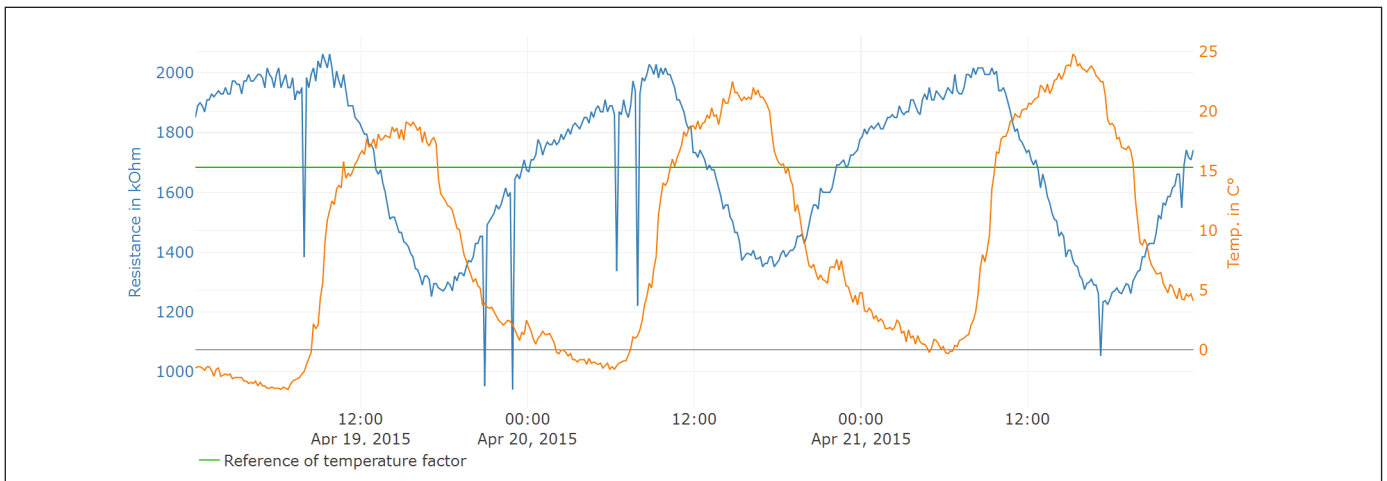


Bild 4: Median des Isolationswiderstandes (blau) und die in Metten gemessene Temperatur am Boden (5 cm über Grund). Die grüne Linie markiert den für diesen Zeitraum ermittelten Referenzwiderstand von 1684 kΩ bei 15,6°C für die Bestimmung des Temperaturfaktors (siehe Text). Quelle der meteorologischen Daten: Deutscher Wetterdienst, DWD

Fig. 4: The median of the insulation resistance (blue) and the ground temperature (5 cm above the ground) measured in Metten. The green line marks the reference resistance of 1,684 kΩ designated for this period for the determination of the temperature factor (see the text). Source of the meteorological data: Deutscher Wetterdienst, DWD

ten Niederschlag vergangene Zeit abgeleitet. Für den Abgleich der erfassten Isolationswiderstände mit den meteorologischen Daten wurden für das 10-Minuten-Abtastintervall der DWD-Daten die Medianwerte der in den entsprechenden Zeitfenstern erfassten Werte des Isolationswiderstandes bestimmt. Diese geben aufgrund der glättenden Wirkung und der Unterdrückung einzelner Ausreißer dabei die kontinuierlichen Veränderungen besser wieder. Bei der Analyse und Interpretation des Isolationswiderstandes anhand der verfügbaren meteorologischen Daten ist zu berücksichtigen, dass die DWD-Station in Metten etwa 9 km vom Bahnhof Plattling entfernt ist. Die lokalen meteorologischen Bedingungen, insbesondere die Niederschlagsmengen, können im Einzelfall erhebliche Unterschiede aufweisen. Aus diesem Grund sind die verfügbaren Daten lediglich dazu geeignet, grundlegende Zusammenhänge zu erkennen. Bei der Verwendung für ein prädiktives Modell sind jedoch erhöhte Unsicherheiten zu erwarten. Aufgrund der im Nachfolgenden dar-

the basis of the available meteorological data, it should be noted that the DWD station in Metten is approximately 9 km from the Plattling railway station. The local meteorological conditions, in particular the amount of precipitation, can vary considerably over such a distance. For this reason, the available data set is only suitable for identifying basic relationships. However, increased uncertainties have to be expected, when using it in a predictive model. Due to the very high relevance of the local meteorological conditions presented in the following, it is conceivable that the continuous recording of the local meteorological conditions in the geographic area covered by the electronic interlocking will be necessary for the successful application of embedded automatic monitoring systems in operation.

Fig. 1 shows the 10-minute mean values of the insulation resistance in the period from 15th March 2015 to 2nd May 2015. The mean values from the time windows with observed precipitation are marked

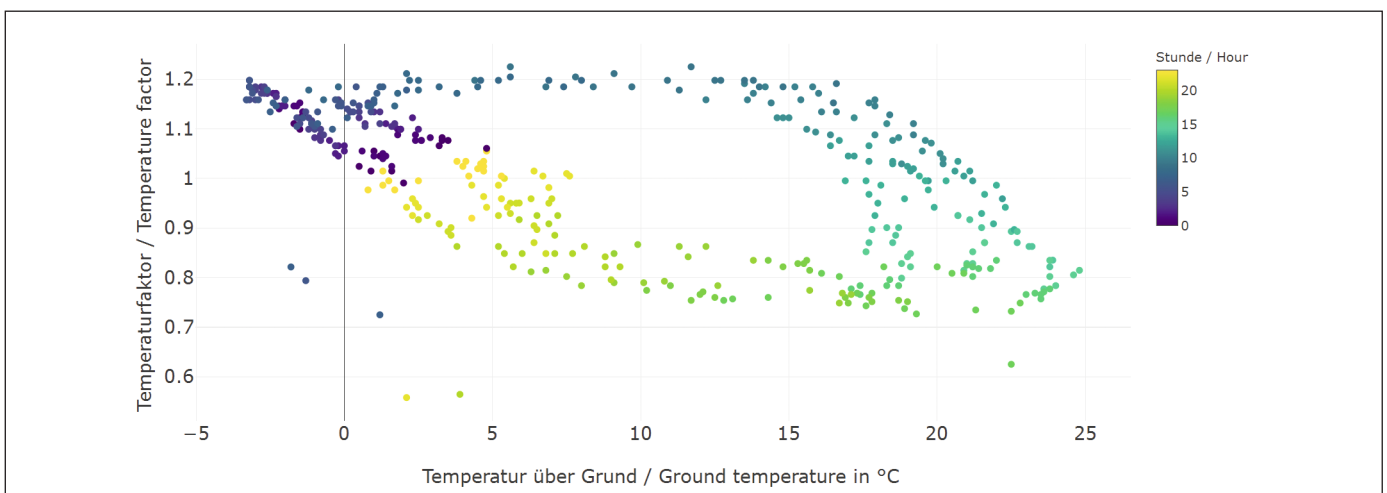


Bild 5: Temperaturfaktoren für die Widerstandsmessungen vom 19. – 21. April 2015 über die am Boden gemessene Temperatur in °C. Die Farbskala markiert die Tageszeit von 0-24 Uhr. Quelle der meteorologischen Daten: Deutscher Wetterdienst, DWD

Fig. 5: Temperature factors for the resistance measurements from 19th to 21st April 2015 over the ground temperature in °C. The colour scale marks the time of day from 0 – 24 o'clock. Source of the meteorological data: Deutscher Wetterdienst, DWD

gestellten sehr hohen Relevanz der lokalen meteorologischen Bedingungen ist es absehbar, dass für einen erfolgreichen Einsatz eingebetteter automatischer Überwachungssysteme im operativen Betrieb die kontinuierliche Erfassung der lokalen meteorologischen Bedingungen im Wirkungsbereich des ESTW erforderlich sein wird. In Bild 1 sind die 10-Minuten-Medianwerte des Isolationswiderstandes im Zeitraum vom 15. März 2015 bis zum 2. Mai 2015 dargestellt. Die Medianwerte aus Zeitfenstern mit beobachteten Niederschlägen sind gelb markiert. Fallende Niederschläge korrelieren sehr gut mit fallenden Werten des Isolationswiderstandes. Es kann angenommen werden, dass das eindringende Wasser und die Benetzung der Anlagenelemente die Bildung von Erdströmen begünstigt. Aus der Praxis ist bekannt, dass insbesondere fehlerhafte/beschädigte Kabelisolierungen, Muffen und Gehäuse bei Niederschlägen und Überflutungen häufig zu Isolationsfehlern führen. Unmittelbar nach den Niederschlägen beginnt eine Erholung des Isolationswiderstandes (z.B. Anfang April in Bild 1). In Zeiträumen ohne Niederschläge (z.B. 19. – 21. April 2015, Bild 4) weist der beobachtete Isolationswiderstand einen ausgeprägten Tagesgang auf. Dabei werden nach einer kontinuierlichen Zunahme des Isolationswiderstandes in den Nachtstunden die höchsten Isolationswerte in den Morgen- und Vormittagstunden erreicht. Im Tagesverlauf sinkt der Isolationswiderstand kontinuierlich wieder ab. Es besteht eine negative Korrelation mit der Temperatur, wobei die Zunahme des Widerstandes in den Abend- und Nachtstunden langsamer erfolgt als die Abnahme während des Tages. Eine Abnahme des Isolationswiderstandes mit zunehmender Temperatur ist für viele Isolationsmaterialien bekannt. Bei der Isolationsprüfung elektrischer Anlagen wie Generatoren und Motoren sowie einzelner Kabel ist die Verwendung von materialabhängigen Temperaturkorrekturfaktoren üblich [3]. Auf diese Weise werden Messungen, die bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt wurden, für Trendanalysen vergleichbar. Für Kabel sind Korrekturfaktoren in Bezug zu einer Referenztemperatur von 15,6°C (der Korrekturfaktor beträgt 1 bei einer Messtemperatur von 15,6°C) verbreitet. Für den in Bild 4 dargestellten Zeitraum vom 19. – 21. April 2015 ohne Niederschläge wurde für die Referenztemperatur von 15,6°C ein mittlerer Isolationswiderstand von 1684 kΩ ermittelt und als Bezugsgröße zur Umrechnung der Medianwerte des Isolationswiderstandes in einen Temperaturfaktor verwendet. In Bild 5 sind die für den Zeitraum vom 19. – 21. April 2015 ermittelten Temperaturfaktoren über die gemessene Bodentemperatur (5 cm über Grund) dargestellt und entsprechend der Uhrzeit farblich markiert. Die Temperaturfaktoren liegen mehrheitlich zwischen 0,7 bis 1,3 bei Temperaturen zwischen -3°C bis zu 25°C und somit in einem für verbreitete Isoliermaterialien üblichen Wertebereich [3]. Der hysteresartige Verlauf des Temperaturfaktors über die Temperatur entsteht infolge der unterschiedlichen und leicht zeitversetzten Entwicklung des Widerstandes in Relation zur Temperatur während der nächtlichen Abkühlung und der täglichen Erwärmung. Die am Boden gemessene Temperatur gibt die tatsächliche Abkühlung und Erwärmung der relevanten Anlagenteile somit nicht unmittelbar wieder. Für die Ableitung empirischer Modelle zur Beschreibung des Anlagenverhaltens ist daher neben der Temperatur die Berücksichtigung der Tageszeit erforderlich. Inwieweit die Berücksichtigung anderweitiger für die Erwärmung und Abkühlung möglicherweise relevanter Faktoren wie z.B. die Sonnenscheindauer erforderlich ist, wird gegenwärtig näher untersucht. In Bild 6 ist der Temperaturfaktor über die Temperatur mit einer farblichen Markierung entsprechend der seit dem letzten Niederschlag vergangenen Zeit in Stunden dargestellt. Mit zunehmender Zeit seit dem letzten Niederschlag werden sowohl während der Abkühlung als auch der Erwärmung bei gleicher Temperatur höhere Widerstände beobachtet. Diese Beobachtung wird als Auswirkung der erfolgreichen Abtrocknung der Anlage interpretiert.

in yellow. Precipitation correlates very well with decreasing values of insulation resistance. It can be assumed that the penetrating water and the wetting of the system elements promote the formation of earth currents. Experience has shown that faulty / damaged cable insulations, sleeves and housings in particular often lead to insulation faults during rainfall or flooding. The insulation resistance begins to recover immediately after the end of the precipitation (i.e. from the beginning of April in fig. 1). In periods without precipitation (i.e. April 19th to 21st, fig. 4), the observed insulation resistance shows a distinct daily course. The highest insulation values are achieved in the morning hours after the continuous increase in insulation resistance during the night hours. The insulation resistance then decreases continuously throughout the day. There is a negative correlation with temperature, whereby the increase in resistance in the evening and at night is slower than the decrease during the day. A decrease in insulation resistance as temperature increases is known for many insulation materials. It is common to use material-dependent temperature correction factors when testing the insulation of electrical systems such as generators and motors as well as individual cables [3]. In this way, measurements taken at different temperatures are comparable for trend analysis. For cables, correction factors are common in relation to a reference temperature of 15.6°C (the correction factor is 1 for a measured temperature of 15.6°C). A mean insulation resistance of 1,684 kΩ was determined for the reference temperature of 15.6°C for the period from 19th to 21st April 2015 without any rainfall (shown in fig. 4) and was used as a reference for the conversion of the median values of the insulation resistance into a temperature factor. Fig. 5 shows the temperature factors determined for the period from 19th to 21st April over the measured ground temperature (5 cm above ground) and marked in different colours according to the time of day. The temperature factors mostly fall between 0.7 and 1.3 at temperatures between -3°C up to 25°C and as such are within a range which is usual for common insulating materials [3]. The hysteresis-like progression of the temperature factor over the temperature arises as a result of the different resistances in relation to temperature during nightly cooling and daily heating. The temperature measured on the ground therefore does not directly reflect the actual cooling and heating of the relevant system components. In order to derive empirical models for the description of plant behaviour, it is therefore necessary to consider the time of day in addition to the temperature. The extent to which it is necessary to consider other factors which may be relevant for heating and cooling, such as the duration of the sunshine, for the example, is currently being studied in more detail. Fig. 6 shows the temperature factor over the temperature with coloured markings corresponding to the time in hours since the last precipitation. As the time since the last precipitation increases, higher resistances are observed at the same temperature, both during cooling and heating. This observation has been interpreted as an effect of the drying out of the plant.

The previous exploratory data analysis in relation to the meteorological conditions has shown that the temperature measured on the ground and the amount of precipitation are decisive for the interpretation of the insulation resistance of electronic interlocking electrical installations. It is expected that the system behaviour during precipitation as well as the development of the insulation resistance during the drying process can provide important information about the general condition of the electrical system in the future. Further conditions relevant for drying and heating, such as the duration of sunshine, frost, snowfall, etc., are currently being studied. Furthermore, an investigation must be made as to what extent the development of the average system temperature affects the insulation resistance over the course of days and weeks in addition to the observed daily cycle.

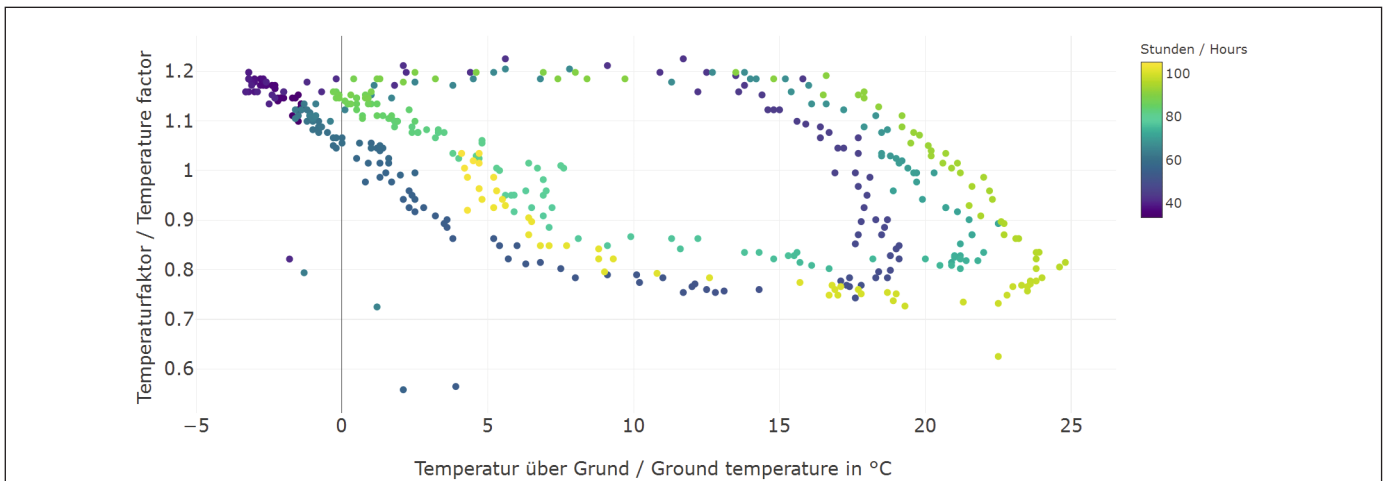


Bild 6: Temperaturfaktoren für die Widerstandsmessungen vom 19. – 21. April 2015 über die am Boden gemessene Temperatur in °C. Die Farbskala markiert die Zeit seit dem letzten Niederschlag in Stunden. Quelle der meteorologischen Daten: Deutscher Wetterdienst, DWD

Fig. 6: Temperature factors for the resistance measurements from 19th to 21st April 2015 over the ground temperature in °C. The colour scale marks the time since the last precipitation in hours. Source of the meteorological data: Deutscher Wetterdienst, DWD

Die bisherige explorative Datenanalyse zu den meteorologischen Bedingungen hat ergeben, dass insbesondere die am Boden gemessene Temperatur sowie die Niederschlagsmenge für eine Interpretation des Isolationswiderstandes zur Anlagenbeurteilung maßgeblich sind. Es wird erwartet, dass das Anlagenverhalten bei Niederschlägen sowie die Entwicklung des Isolationswiderstandes im Laufe der Abtrocknung zukünftig wichtige Hinweise über den Allgemeinzustand der elektrischen Anlage eines ESTW geben können. Weitere für die Abtrocknung und Erwärmung relevante Bedingungen wie z.B. die Sonnenscheindauer, Frost, Schneefall etc. werden gegenwärtig untersucht. Weiterhin ist zu untersuchen, inwieweit sich die Entwicklung der mittleren Anlagentemperatur im Verlauf von Tagen und Wochen neben dem beobachteten Tagesgang auf den Isolationswiderstand auswirkt. Die bisherigen Auswertungen der Niederschlagsmengen legen nahe, dass die Stärke des Widerstandsabfalls in Relation zur Gesamtniederschlagsmenge der vergangenen 12 – 24 Stunden stehen könnte. Die Ableitung einer zuverlässigen empirischen Relation war für den gesamten Messzeitraum von Januar 2015 bis August 2016 bislang jedoch noch nicht möglich. Ursache hierfür könnten neben den oben genannten noch nicht berücksichtigten Faktoren (z.B. Frost, Niederschlagsform) auch Unterschiede zwischen den tatsächlichen Niederschlagsmengen am Messstandort in Metten und dem Stellwerksgebiet in Plattling sein. Hier sind zukünftig weitere Untersuchungen mit zeitlich hoch aufgelösten lokalen meteorologischen Messungen im Rahmen der geplanten weiteren Messkampagnen erforderlich.

5 Nächste Schritte / Ausblick

Der bisher verfügbare experimentelle Datensatz vom ESTW in Plattling hat bereits zu einer Reihe von wertvollen neuen Erkenntnissen über das Verhalten der elektrischen Anlage aktueller ESTW geführt. Die kontinuierliche Erfassung des Isolationswiderstandes bietet hohes Potenzial zur Entwicklung einer vollautomatischen Überwachung von ESTW-Kabelanlagen zur frühzeitigen Erkennung sich anbahnender Isolationsfehler sowie zur Beurteilung des Gesamtzustandes der elektrischen Anlage als Grundlage für Erneuerungs- und Instandhaltungsmaßnahmen. Die Beschränkungen des aktuell verfügbaren experimentellen Datensatzes erlauben jedoch noch nicht die Entwicklung eines praxistauglichen Verfahrens. Insbesondere

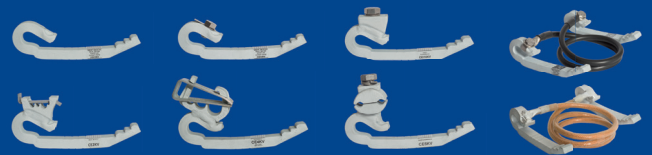
So far, evaluations of precipitation suggest that the magnitude of the resistance interruption could be related to the total rainfall over the past 12 – 24 hours. However, it has not yet been possible to derive a reliable empirical relation for the entire measurement period from January 2015 to August 2016. In addition to the aforementioned factors (i.e. frost, type of precipitation, etc.), this could also be due to

Schnellster Schienenkontakt



KAGO Klemme

Das Original
seit 1980



KAGO AG – Schweiz
Eisenbahntechnik
info@kago.com

kaufmann
www.kago.com

metal - electric

die geeignete Abbildung des Stellwerksbetriebs und dessen Abgleich mit der zeitlichen Entwicklung des Isolationswiderstands stellen dabei aktuell für die Entwicklung der Algorithmen zur Zustandsüberwachung und -diagnose die größte Herausforderung dar. Um die Datengrundlage für die Entwicklung operativ einsetzbarer prädiktiver Modelle zu verbessern und um die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf andere ESTW zu untersuchen, wird im Rahmen der Kooperation von Bender, DB Netz und DLR gegenwärtig eine Messkampagne an zehn ausgewählten ESTW der DB Netz vorbereitet. Das DLR plant weiterhin, diesen Anwendungsfall einer eingebetteten Zustandsüberwachung für die Leit- und Sicherungstechnik in die entsprechenden Forschungsaktivitäten im Rahmen des EU-Joint Undertaking Shift2Rail einzubringen.

Weiterhin liegen einige noch nicht genutzte Potenziale in verschiedenen technischen Besonderheiten mancher ESTW. Bei einer großen Anzahl von ESTW der DB Netz AG mit problematischen Kabelanlagen (im Sinne auftretender Isolationsfehler) sind adrig verseilte Kabel einer bestimmten Serie eingesetzt worden. Eine Besonderheit dieser Kabelserie ist die Ausstattung mit zwei Prüfadern mit perforierter Ader-Isolation. Die gängige Hypothese besagt, dass in die Kabel eindringende Feuchtigkeit ein Hauptverursacher für die in der Praxis beobachteten Isolationsfehler sein könnte. Eine Überwachung der Kabel hinsichtlich eindringender Feuchtigkeit ist anhand der vorhandenen Prüfadern technisch leicht möglich, dieses Potenzial wird bislang jedoch kaum zur Detektion sich anbahnender Isolationsfehler genutzt. Weiterhin ist bekannt, dass Leckagen und defekte Isolationen, die zu eindringender Feuchtigkeit führen, die Ableitkapazität erhöhen. Durch die Inbetriebnahme der Geräteserie ISOMETER iso685 der Firma Bender wird es möglich werden, diese zu bestimmen, aufzuzeichnen und in die Analysen einfließen zu lassen. Letztlich bieten die aktuellen Entwicklungen zu hochintegrierten Systemarchitekturen auch in der Instandhaltung der Leit- und Sicherungstechnik die Gelegenheit, Messdaten nicht nur isoliert vor Ort zu betrachten, sondern diese zentral (z. B. in einer Cloudlösung) zu sammeln und dort vergleichende Analysen anzustellen. ■

the differences between the actual precipitation at the measuring site in Metten and the interlocking area in Plattling. In the future, further investigations into local meteorological measurements with high temporal resolution will be necessary as part of the planned measurement campaigns (see next section).

5 Next steps / Outlook

The experimental data set available so far from the electronic interlocking in Plattling has already led to a number of valuable new findings on the behaviour of the current electronic interlocking electrical system. The continuous monitoring of the insulation resistance offers high potential for the development of the fully automatic monitoring of electronic interlocking electrical systems for the early detection of impending insulation faults and for the assessment of the overall condition of the electrical system as the basis for renewal and maintenance measures. However, the limitations of the currently available data set do not yet allow the development of a practical procedure. In particular, the appropriate representation of the interlocking operation and its alignment with the development of the insulation resistance over time is currently the greatest challenge to the development of condition-monitoring and diagnosis algorithms. In order to improve the data basis for the development of operationally applicable predictive models and to investigate the transferability of the gained knowledge to other electronic interlocking, a new measurement campaign is currently being prepared at ten selected electronic interlockings belonging to DB Netz AG within the framework of the cooperation between Bender, DB Netz and the DLR. The DLR is also planning to integrate this application of embedded condition-monitoring for control and safety technology into the corresponding research activities within the framework of the EU Shift2Rail joint undertaking. There is still some unused potential in the exploitation of various local technical features. Stranded cables of a certain series have been used in a large number of electronic interlockings with problematic cable systems at DB Netz AG (in the case of insulation faults). A special feature of this cable series is the configuration with two test leads with perforated core insulation. The common hypothesis is that moisture penetrating the cable could be a major cause of the insulation faults observed in practice. It is technically easy to monitor the cables for moisture penetration using the existing test leads, but this potential is hardly ever used to detect incipient insulation faults. Furthermore, it is known that leaks and defective insulation, which cause moisture ingress, increase the discharge capacity. By commissioning Bender's ISOMETER iso685 device series, it will be possible to determine, record and incorporate these into the analyses. The latest developments in highly integrated system architectures also offer the opportunity of not only analysing the measured data on site, but also collecting it centrally (for example in a cloud solution) and carrying out comparative analyses there. ■

AUTOREN | AUTHORS

Dr. rer. nat. Jörn Groos
Projektleiter / Project Leader
E-Mail: joern.groos@dlr.de

Dr.-Ing. Xiang Zhang
Wissenschaftliche Mitarbeiterin / Research Associate
E-Mail: xiang.zhang@dlr.de

Dipl.-Geoinf. Christian Linder
Gruppenleiter Systemarchitekturen / Group Leader Systems Architecture
E-Mail: christian.linder@dlr.de

Alle Autoren / all authors:
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Verkehrssystemtechnik
Anschrift / Address: Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig

LITERATUR | LITERATURE

- [1] Lüddecke, K.; Böhm, T.: Vom Sensor bis zur Entscheidung: Effizienz in der gesamten Verarbeitungskette. In: SIGNAL+DRAHT 7+8/2014, S. 10–14
- [2] Linder, C.; Schenkendorf, R.: Datengetriebene Diagnoseansätze für ESTW-Kabelanlagen. In: SIGNAL+DRAHT 10/2015, S. 16–21. URL <http://elib.dlr.de/97274/>
- [3] Zurek, S.; El-Rasheed, A.; Ohlen, M.: Individual temperature correction (ITC) for insulation resistance measurements. In: 2017 INSUCON – 13th International Electrical Insulation Conference (INSUCON), S. 1–5